

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709056

研究課題名(和文)高性能スピンドバイスのためのねじれ磁気構造材料の創製

研究課題名(英文) Fabrication of twisted magnetic structure materials for high-performance spin devices

研究代表者

関 剛斎 (SEKI, Takeshi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：40579611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、空間的にねじれた磁気構造を微小領域において精密に制御することで、スピンドバイスの高性能化に資するねじれ磁気構造材料の創製を行うことを主目的とし、異種磁性金属の積層化、微小磁性体におけるねじれ磁気構造および磁化ダイナミクスの解明と制御、変調スピンド流による磁化反転、さらにスピンド起電力の発生を目指して研究を遂行した。その結果、垂直磁化配置を用いた高効率な磁化反転技術の確立、ねじれ磁気構造におけるスピントルクの機構解明、さらにスピンド波ダイナミクスに起因するスピンド起電力の観測に成功した。以上より、ねじれ磁気構造材料を利用することでスピンドバイスの高性能化に繋がることが示された。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research project was to develop artificially-controlled magnetic structures having spatially twisted magnetization configurations in order to realize high performance spin devices. We successfully controlled the twisted magnetic structures by using the L10-FePt | Ni81Fe19 exchanged-coupled bilayers, and systematically investigated the magnetization dynamics for the twisted magnetic structures. We demonstrated the high efficient magnetization switching in the perpendicular configuration owing to the characteristic dynamics of the magnetic vortex formed in the bilayer, and examined the spin torque for nonuniform magnetic structures by exploiting the twisted magnetic structures. Also, we successfully observed the spin motive force in the twisted magnetic structure, which originated from the spin wave dynamics.

研究分野：磁性材料学

キーワード：磁気構造制御 スピンドバイス 磁化ダイナミクス ナノ構造 積層制御

1. 研究開始当初の背景

電子の持つ電荷とスピンという2つの性質を利用するスピントロニクスは、情報の不揮発性という半導体エレクトロニクスには無い魅力を有しており、超低消費エネルギーで動作可能なスピンドバイスの実現が期待されている。スピンドバイスを支える代表的な現象に、巨大磁気抵抗効果(GMR)やトンネル磁気抵抗効果(TMR)がある。GMRとは、磁性層/非磁性層/磁性層の3層構造において、2つの磁性層の磁化相対角に依存して抵抗が変化する現象である。現在では、非磁性層をトンネル障壁層に置き換えたTMRや、伝導電子との相互作用により磁化を反転させるスピントルク磁化反転などを利用し、磁気ランダムアクセスメモリなどの磁気メモリ素子の開発が進められている。また、チップ間通信や次世代磁気ヘッドなどへの応用が検討されているスピントルク発振器や、磁化運動から直流電圧を作るスピン起電力発生器など多様なデバイスが提案されている。

しかしながら、研究開始当初、上記のスピンドバイスを実現する、あるいは高性能化するためには、解決しなくてはならない課題が山積していた。例えば、高集積可能な磁気メモリ素子の開発には、「磁化の高い熱安定性」と「高効率な情報書き込み」を両立しなくてはならない。磁化の熱安定性は磁気異方性(K)と磁性体積との積で決まるため、微小素子で熱安定性を確保するには K の大きな材料が必須となる。一方で、高い K は情報記録に大きな磁化反転磁場や反転電流を必要とする。そこで、低エネルギー磁化反転を可能とする磁性材料や積層構造の開発が不可欠であった。また、スピントルク発振素子では、発振に至る電流値の低減や発振周波数の高周波化を可能とする磁性材料が切望されていた。さらに、スピン起電力の観点では、発生電圧の大幅な向上が期待できる磁気構造が空間的に変化した材料の開発が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、空間的にねじれた磁気構造を微小領域において精密に制御することで、スピンドバイスの高性能化に資するねじれ磁気構造材料の創製を行った。従来のスピントロニクスでは、均一な磁気構造を有する材料を用いることがデバイス動作の基礎となっているが、ねじれた磁気構造を人工的に制御することで、均一磁気構造では実現不可能な機能をデバイスに付与できることに着目した。具体的には、高度薄膜成長技術による異種磁性金属の積層化、微小磁性体におけるねじれ磁気構造の制御、そして空間的に不均一な磁化ダイナミクスの解明と制御に取り組んだ。そして、得られた知見をもとに、(1)高効率な磁化反転技術の確立、(2)ねじれ磁気構造におけるスピントルクの機構解明、さらに(3)スピン起電力の観測を目指した。このねじれ磁気構造材料の利用により、スピンド

バイスの更なる高集積化、低エネルギー化、高速化、および多機能化に繋げるための方向性を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

まず「(1)高効率な磁化反転技術の確立」に関しては、スパッタ法と微細加工プロセスを用いて図1(a)に模式的に示した微小ドットを作製し、垂直磁化を含むねじれ磁気構造という特異な磁気構造の制御を試みた。さらに、電気的手法および光学的手法を用いることで、ねじれ磁気構造に特有の磁化ダイナミクスが磁化反転に与える影響を調べ、実験結果と数値計算と比較することで詳細な磁化反転機構を議論した。

次に「(2)ねじれ磁気構造におけるスピントルクの機構解明」については、スパッタ法と微細加工プロセスを用いて図1(b)に示した面垂直通電型(CPP)GMR素子を作製し、電気抵抗測定を行った。ここでGMR素子はねじれ強磁性層/非磁性層/強磁性層から構成される積層構造とした。磁気抵抗(MR)曲線の測定、および直流電流印加下での微分抵抗測定を行うことで、スピントルクがねじれ磁気構造に与える影響を系統的に調べた。MR測定および微分抵抗測定には、ソースメータとロックインアンプを用い、高周波対応のプロンプによりCPP-GMR素子にアクセスした。

「(3)スピン起電力の観測」は図1(c)に示した素子において検討した。スパッタ法と微

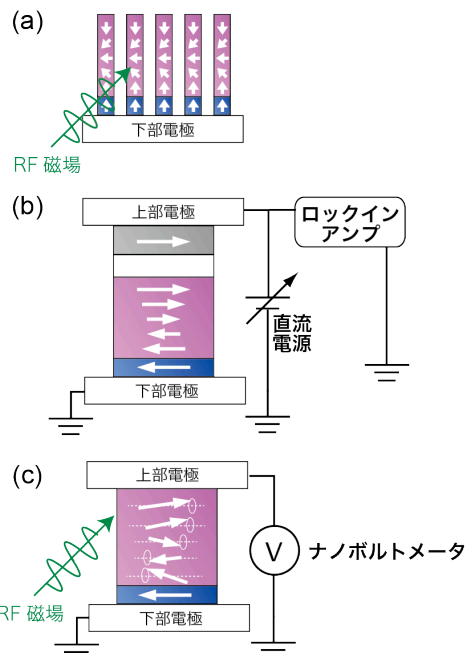


図1 本研究で用いた素子の模式図。(a) 垂直磁化ねじれ磁気構造を有するナノドット、(b) ねじれ強磁性層/非磁性層/強磁性層から構成されるCPP-GMR素子、および(c)面内磁化ねじれ磁気構造を有する柱状素子。

細加工プロセスにより面内磁化を有する交換結合膜を有する素子を作製し、高周波磁場を印加しながら素子の上下端に発生する電圧を測定した。コプレーナ導波路に信号発生器から高周波電圧を投入することで、素子周辺に高周波磁場を発生させた。発生した起電力を、ロックインアンプを用いた変調法により検出した。

4. 研究成果

「(1)高効率な磁化反転技術の確立」に関しては、応用を視野にいたした垂直磁化を有するナノ構造体において、ねじれた磁気構造を利用した磁化反転について検討を行った。垂直磁化を有する $L1_0$ -FePt 層とソフト磁性体であるパーマロイ合金(Py; $Fe_{19}Ni_{81}$)層を積層させた薄膜試料を作製し、微細加工法によってナノドット形状へと加工した。その結果、垂直磁化配置においても、膜面垂直方向に磁化がねじれた構造が Py 層内に形成されることが明らかとなり、スプリングバックなどねじれた磁気構造に特有の現象が観測された。

さらに、実験結果と数値計算を比較したところ、Py 層内においては面内に磁気ボルテックスが形成されていることが判明した。そこで、外部から高周波磁場を印加し Py 層内の磁気ボルテックスの運動を励起したところ、FePt 層の磁化反転磁場が大幅に低下することが明らかとなった。図 2 に反転磁場(H_{sw})の高周波磁場の周波数(f)依存性を示す。 $f = 10$ GHz 近傍において H_{sw} の低減が得られており、数値計算が実験結果をよく再現していることがわかる。詳細なマイクロマグネティクスシミュレーションを行ったところ、磁気ボルテックスのspin波モードを励起することにより局所的に交換エネルギーが増大し、蓄積されたエネルギーを低減するために FePt 層に逆磁区の核生成が起こるという反転メカニズムが解明された。

上記の垂直磁化配置の研究内容に加えて、面内磁化を有する $L1_0$ -FePt 層/Py 層の素子においてパルス状の高周波磁場を印加した場合の磁化反転挙動についても検討を行い、共鳴的に磁化反転が生じていることを実験的に明らかにした。

「(2)ねじれ磁気構造におけるスピントルクの機構解明」については、面内磁化を有する $L1_0$ -FePt 層と Py 層をねじれ強磁性層とし、それらの層の上に非磁性 Cu 層および強磁性 Py 層を積層させた GMR 構造を用いた。図 3 に、典型的な磁気抵抗曲線および微分抵抗の直流電流依存性を示す。得られた磁気抵抗効果は、ねじれ強磁性層を構成する Py 層と均一な磁気構造を有する上部 Py 層間の磁化配列の変化に起因するものであり、ねじれ強磁性層/非磁性層/強磁性層の積層構造において CPP-GMR 効果の観測に成功した。

この GMR 構造に直流電流を印加すると、微分抵抗に変化が現れた。外部磁場条件および電流方向より、上部 Py 層の磁化方向が変

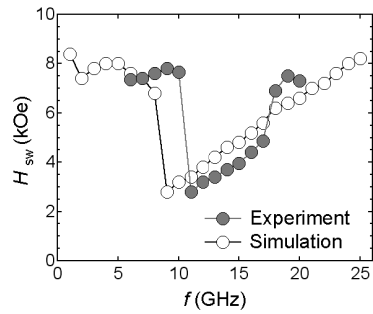


図 2 垂直磁化型ねじれ磁気構造を有するナノドットにおける反転磁場(H_{sw})の高周波磁場の周波数(f)依存性。●が実験結果、○が数値計算の結果である。

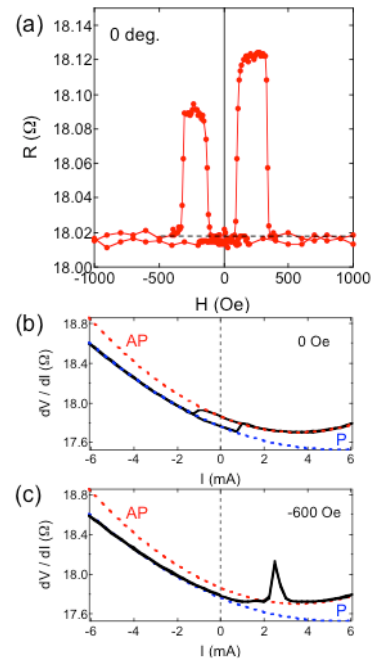


図 3 面内磁化 $L1_0$ -FePt 層と Py 層をねじれ強磁性層とし、非磁性 Cu 層および強磁性 Py 層を積層させた GMR 構造における (a) 磁気抵抗曲線および (b,c) 微分抵抗の直流電流依存性。

化したことによる抵抗変化であると考えられ、ねじれ強磁性層で spin 偏極した電子が上部 Py 層の磁化と相互作用し、スピントルクが働いたことが示唆された。ここで、図 3(b) に示した磁化反転を示唆するヒステリシスの他に、図 3(c) の可逆的な変化が微分抵抗の直流電流依存性に観測された。この可逆的な変化はスピントルク発振の開始を意味することが多いが、本素子においてスピントルク発振は観測されなかった。この原因については現在のところ不明だが、不均一な磁気構造を有するねじれ強磁性層に特有の現象であると推察される。この結果は、ねじれ強磁性層を spin 偏極層に用いることで、磁化励起など磁化の不安定性を抑制できることを示唆しており、応用上有用な知見が得られた。

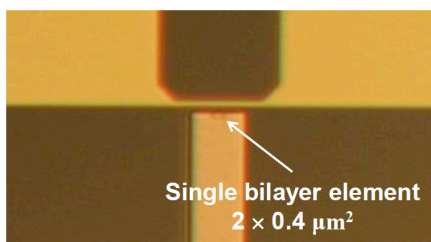


図4 微細加工によって作製した面内磁化ねじれ磁気構造を有する単一柱状素子および高周波磁場印加用電極の光学顕微鏡像。

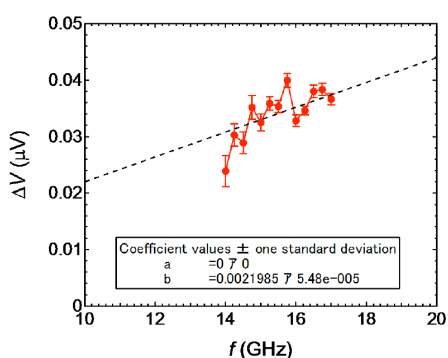


図5 面内磁化ねじれ磁気構造を有する単一柱状素子における直流電圧と高周波磁場の周波数の関係。

「(3)スピン起電力の観測」では、面内磁化を有する $L1_0$ -FePt 層と Py 層の柱状素子を作製し、外部から高周波磁場を印加して柱状素子端に現れる直流電圧を測定した。図4に、微細加工によって作製した素子の光学顕微鏡像を示す。高周波磁場を発生するためのコプレーナ導波路の横に、上下電極を有する柱状素子を配置した。得られた直流電圧と高周波磁場の周波数の関係を図5示す。周波数の増加に対して、直線的に直流電圧が増加していることが明らかとなった。この傾向は、スピン起電力の理論の枠組みで理解することができ、ねじれた磁気構造を示す素子においてスピン起電力の観測に成功した。また、定在スピン波がスピン起電力の発生をもたらしていることも明らかになった。

以上より、本研究課題を遂行することにより、空間的にねじれた磁気構造を用いた低エネルギー磁化反転技術や特徴的なスピントルク現象、さらには定在スピン波によるスピン起電力の観測など、基礎学問およびデバイス応用の両観点で有用な知見を得ることに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

① 著者名：T. Seki, W. Zhou, and K. Takanashi, 論文標題：“Resonant switching for an in-plane magnetized $L1_0$ -FePt | $Ni_{81}Fe_{19}$ bilayer under spin wave excitation”,

雑誌名：J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 49, pp. 075002-1-10 (2016). 査読有

doi:10.1088/0022-3727/49/7/075002

② 著者名：関剛斎、周偉男、高梨弘毅

論文標題：“スピン波励起を利用した低磁場磁化反転”

雑誌名：まぐね, Vol. 10, pp. 314-319 (2015).

査読有

③ 著者名：W. Zhou, T. Seki, H. Iwama, T. Shima, and K. Takanashi,

論文標題：“Perpendicularly magnetized $L1_0$ -FePt nanodots exchange-coupled with soft magnetic $Ni_{81}Fe_{19}$ ”,

雑誌名：Journal of Applied Physics, Vol. 117, pp. 013905-1-6 (2015). 査読有

doi: 10.1063/1.4905302

④ 著者名：関剛斎、高梨弘毅「スピン波を利用した磁化スイッチング」応用物理, Vol. 84, (2015) pp. 61-65. 査読有

⑤ T. Seki, K. Hotta, H. Imamura, Y. Nozaki, and K. Takanashi,

論文標題：“Characteristic field angular dependence of magnetization switching assisted by spin wave excitation”,

雑誌名：Applied Physics Letters, Vol. 103, pp. 122403-1-4 (2013). 査読有

doi: 10.1063/1.4821208

〔学会発表〕(計19件)

① 発表者名：T. Seki, W. Zhou, H. Arai, H. Imamura and K. Takanashi

発表標題：“Vortex Dynamics-Mediated Magnetization Switching in $L1_0$ -FePt | $Ni_{81}Fe_{19}$ Nanodots”

学会名：13th Joint MMM-Intermag Conference

発表年月日：2016年1月14日

発表場所：San Diego (USA)

② 発表者名：T. Seki, W. Zhou, and K. Takanashi

発表標題：“Magnetization switching in hard magnet triggered by exchange-coupled soft magnet”

学会名：JSPS Core-to-Core Workshop on New-Concept Spintronics Devices

発表年月日：2015年11月12日

発表場所：東北大学(仙台市)

③ 発表者名：関剛斎、周偉男、今村裕志、荒井礼子、高梨弘毅

発表標題：“垂直磁化 FePt | Ni₈₁Fe₁₉ ナノドットにおける磁気渦ダイナミクスを介した磁化反転”

学会名：第 39 回日本磁気学会学術講演会

発表年月日：2015 年 9 月 11 日

発表場所：名古屋大学 (名古屋市)

④ 発表者名：T. Seki, W. Zhou, and K. Takanashi

発表標題：“Spin wave dynamics for microfabricated elements with exchange-coupled bilayers”

学会名：22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces

発表年月日：2015 年 7 月 17 日

発表場所：Cracow (Poland)

⑤ 発表者名：W. Zhou, T. Seki, and K. Takanashi

発表標題：“Electromotive Force in a L1₀-FePt / Ni₈₁Fe₁₉ Bilayer Element”

学会名：New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics 2015

発表年月日：2015 年 6 月 11 日

発表場所：東京大学 (柏市)

⑥ 発表者名：W. Zhou, T. Seki, H. Arai, H. Imamura, and K. Takanashi

発表標題：“Spin Wave-Assisted Switching in Perpendicularly Magnetized Bilayers”

学会名：The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference

発表年月日：2014 年 11 月 6 日

発表場所：Honolulu (USA)

⑦ 発表者名：T. Seki, and K. Takanashi

発表標題：“Magnetization switching induced by spin wave excitation.”

学会名：IUMRS-ICA 2014

発表年月日：2014 年 8 月 25 日

発表場所：福岡大学 (福岡市)

⑧ 発表者名：T. Seki

発表標題：“Spin Wave Dynamics and Magnetization Switching in Exchange-Coupled Bilayers”

学会名：APS March Meeting 2014

発表年月日：2014 年 3 月 5 日

発表場所：Denver (USA)

⑦ 発表者名：T. Seki, and K. Takanashi

発表標題：“Magnetization Switching Assisted by Spin Wave Excitation.”

学会名：The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2013)

発表年月日：2013 年 7 月 23 日

発表場所：Taichung (Taiwan)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：マイクロ波アシスト磁気記録媒体

発明者：関剛斎、高梨弘毅

権利者：国立大学法人東北大学

種類：特許

番号：特開 2013-105506

出願年月日：平成 23 年 11 月 10 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関 剛斎 (SEKI, Takeshi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：40579611

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし